

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОТРУЗИИ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ЧЕРЕЗ ОСНОВНОЕ ЧЕРНОМОРСКОЕ ТЕЧЕНИЕ

© 2017 г. К. А. Коротенко

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: kkorotenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.08.2016 г.

После доработки 30.08.2016 г.

Вихреразрешающая $(1/30)^\circ$ версия слабо-диссипативной модели DieCAST [7] использована для моделирования процессов протрузии прибрежных антициклонических вихрей (ПАЦВ) в Основное черноморское течение (ОЧТ). При среднеклиматическом форсинге модель реалистично воспроизводит эволюцию Кавказского ПАЦВ (КПАЦВ) от его зарождения, возбуждения антициклонического меандра в струе ОЧТ, прохождения через ОЧТ до диссипации одиночного свободного вихря в восточном циклоническом круговороте. Рассмотрен также процесс двойной протрузии КПАЦВ и Кизил-Ирмакского ПАЦВ, их прохождения через ОЧТ и слияние в восточной части Черного моря. Пространственно-временные параметры эволюции ПАЦВ при протрузии хорошо согласуются со спутниковыми наблюдениями [15, 23].

DOI: 10.7868/S0030157417020113

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезомасштабные структуры циркуляции Черного моря играют важную роль в процессах обмена между прибрежной зоной и открытым бассейном (рис. 1). Особую роль при этом играют прибрежные антициклонические вихри (ПАЦВ), которые могут аккумулировать загрязнения, поступающие, например, со стоком рек и удерживать их в прибрежной зоне продолжительное время [5], тем самым значительно ухудшая экологию локальных областей между берегом и Основным черноморским течением (ОЧТ). ПАЦВ обычно формируются в результате различных типов неустойчивости ОЧТ и зажаты между ОЧТ и берегом. Однако при определенных условиях некоторые ПАЦВ могут прорываться (protrode) сквозь ОЧТ и тем самым способствовать выносу загрязнений из прибрежной зоны в открытое море.

Классическим примером может служить т.н. Кавказский ПАЦВ (КПАЦВ), периодически рождающийся в районе между Сухуми и Сочи [15, 23]. КПАЦВ по мере роста и продвижения на северо-запад вдоль кавказского побережья при определенных условиях может “выдавливаться” ОЧТ в сторону моря, способствуя развитию широкого антициклонического меандра, охватывающего КПАЦВ. Постепенно, в процессе протрузии, КПАЦВ оказывается внутри меандра. Такая система “меандр-КПАЦВ” при внешнем, например, ветровом воздействии становится неустой-

чивой и впоследствии, разрушаясь, приводит к отрыву КПАЦВ с внешней стороны меандра и выходу его в открытое море. После этого ОЧТ восстанавливает свое начальное положение, располагаясь ближе к берегу. Такой процесс происходит довольно регулярно, однако известны определенные вариации поведения оторвавшегося вихря, его траектории и диссипации внутри восточного циклонического круговорота. Известны также протрузии ПАЦВ в ОЧТ с Анатолийского побережья. Одно из таких явлений, имевших место в январе–марте 1998 г., было описано в работе [15].

В Черном море может также наблюдаться и более редкое явление: когда протрузии антициклонических вихрей происходят практически одновременно со стороны кавказского и анатолийского побережий. В этом случае сомкнувшиеся антициклонические вихри разрывают ОЧТ к западу от них, а в восточной части моря (в отсутствие Батумского ПАЦВ [9]) остатки ОЧТ самоорганизуются в крупный циклонический вихрь/круговорот.

Примеры эволюции “весеннего” и “зимнего” КПАЦВ, при которых наблюдались процессы протрузии их в антициклонические меандры ОЧТ и последующего их отрыва (detachment) от меандров детально описаны в [15, 23]. В этих работах по данным спутниковых наблюдений определены пространственно-временные масштабы процессов эволюции, по которым можно оценить

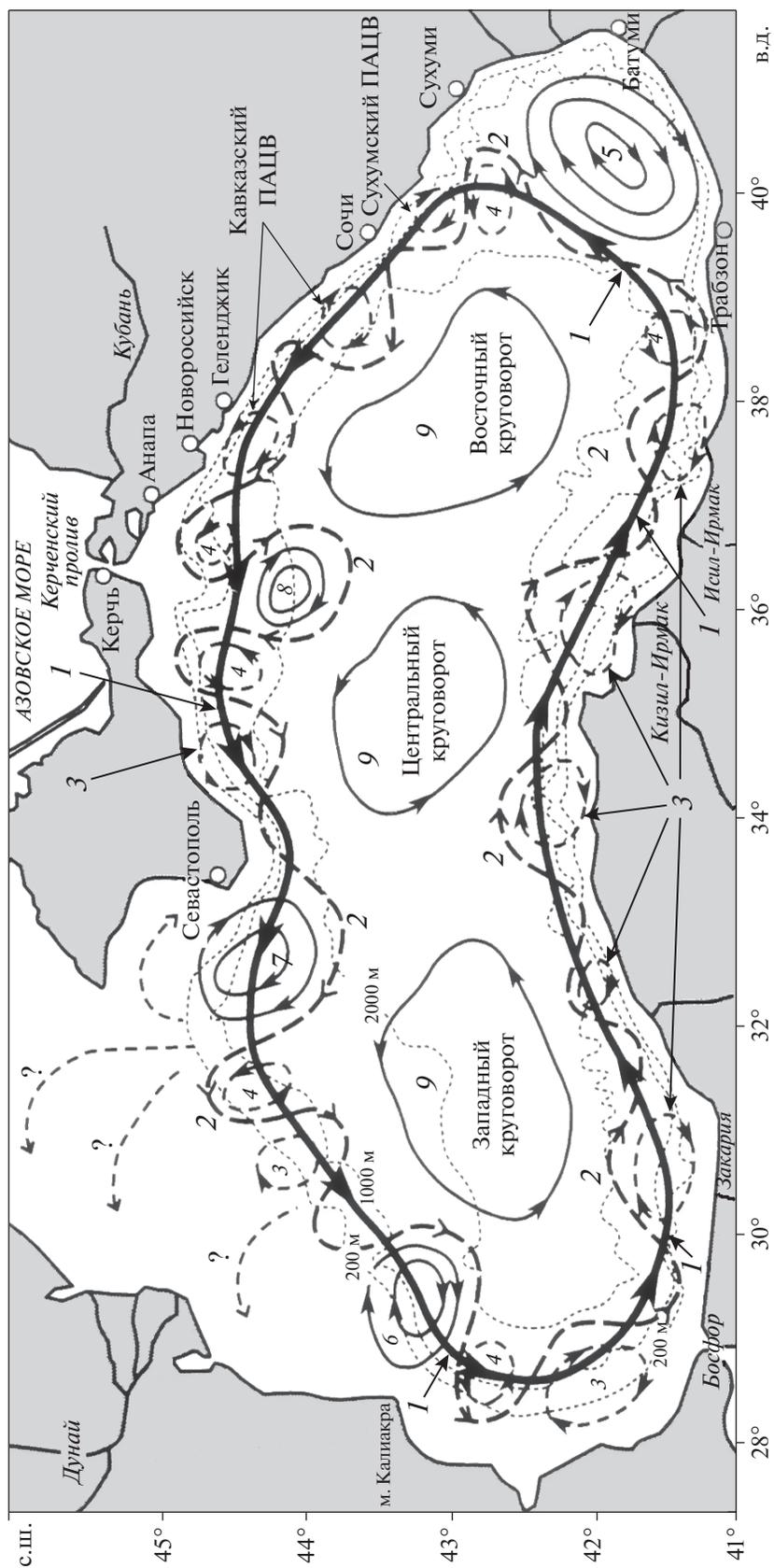


Рис. 1. Сводная схема циркуляции Черного моря. 1 – ОЧТ; 2 – меандры ОЧТ; 3 – ПАЦВ; 4 – циклонические вихри; 5 – Батумский ПАЦВ; 6 – Калиакринский ПАЦВ; 7 – Севастопольский ПАЦВ; 8 – Ялтинский ПАЦВ; 9 – квазистационарные циклонические круговороты [1, 8].

соответствующие параметры, полученные в модельных расчетах.

Цель представленной работы – воспроизвести описанные выше процессы, сравнить их со спутниковыми наблюдениями, а также получить дополнительную к спутниковой информацию о трехмерной структуре и эволюции КПАЦВ.

2. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе мы будем рассматривать область Черного моря к востоку от Керченского пролива, (рис. 1), хотя для моделирования циркуляции мы будем использовать численную модель для всего моря. На схеме, показанной на рис. 1, обобщается разномасштабная структура циркуляции вод Черного моря, составленная на основе многолетних инструментальных и спутниковых наблюдений – см. [7]. Главным элементом этой схемы является Основное черноморское течение – кольцевое вдольбереговое циклоническое течение, стрежень которого находится над изобатой 500 м, а ширина составляет 20–50 км. Как показывают натурные исследования, ОЧТ имеет четкие сезонные различия: оно слабеет в летний период и усиливается в зимний. По периферии ОЧТ окружают многочисленные, преимущественно прибрежные антициклонические вихри размерами порядка 40–60 км, которые вклиниваются между ОЧТ и континентальным шельфом.

По данным современных лабораторных и спутниковых исследований, вихревая динамика Черного моря интенсифицируется в летний период. В это время из-за уменьшения циклонической завихренности ветра и экмановской накачки циркуляции вод ОЧТ ослабевает, разваливается на цепочки интенсивных антициклонов и фактически исчезает, как когерентная струя [1, 17, 22]. В холодные периоды года с увеличением экмановской накачки циркуляции вод ОЧТ усиливается, а вихревая активность моря и, соответственно, количество ПАЦВ уменьшаются.

Следует отметить, что ПАЦВ, аperiodически появляющиеся вдоль берегов Турции, Болгарии и Кавказа, могут играть роль ловушек загрязнения и его доставки вдоль побережья в места, как показывают спутниковые наблюдения, далекие от их происхождения. Кроме того, описываемое явление протрузии КПАЦВ, наряду с другими прибрежными процессами, имеет существенное значение для самоочищения прибрежных вод, загрязнение которых происходит из-за многочисленных рек кавказского побережья [5]. Разработка газовых и нефтяных месторождений на шельфах Турции и Грузии [4, 12, 21], начавшаяся в последние годы, также представляет серьезную угрозу загрязнения Черного моря.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для исследования процессов взаимодействия ПАЦВ с ОЧТ использовалась z -координатная слабо-диссипативная модель циркуляции океана DieCAST [11]. Детальное описание архитектуры модели можно найти на сайте <http://efdl.as.ntu.edu.tw/research/diecast>, а также в работах [16, 19], поэтому остановимся лишь на некоторых деталях адаптации ее к Черному морю [7, 16].

Расчетная сетка модели охватывает весь бассейн Черного моря от 27.2° в.д. до 42° в.д. и от 40.9° с.ш. до 46.6° с.ш. и содержит 426×238 ячеек по горизонтали и 30 неравномерно расположенных уровней по вертикали. Разрешение по долготе выбиралось равным 2 морским минутам (в работе использовалась несглаженная топография дна ETOPO2), а по широте оно менялось так, чтобы отношение размеров горизонтальных ячеек $\Delta X/\Delta Y$ сохранялось равным единице [6]. Таким образом, размеры квадратных ячеек менялись только с широтой от 2.6 до 2.8 км. Шаг по вертикали был неоднороден, со сгущением сетки у поверхности моря для лучшего разрешения сезонного термоклина.

Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии тепла и соли находились по известной формуле Смагоринского. Для расчета вертикальной диффузии тепла и соли, а также вязкости в модели использовалась “ $k-\epsilon-\tau$ ” модель турбулентности с замыканием второго порядка для диффузионных членов, описывающих кинетическую энергию турбулентности k и ее диссипации ϵ . Для оценок напряжений Рейнольдса τ в модели турбулентности использовались алгебраические выражения Лаундера–Сполдинга [6]. Для инициализации модели использовались среднемесячные январские данные температуры и солёности.

Модель запускалась из состояния покоя (т.е. везде скорость течения была равна нулю), а для ее “раскрутки” использовались среднепогодные (ежемесячные) данные по напряжению ветра, потокам тепла, испарению, осадкам и стоку рек [19]. Сток рек – 31 река по периметру Черного моря – задавался по среднеклиматическим данным [13], которые интерполировались так, чтобы годовой цикл был непрерывен. Детально этот алгоритм описан в [7, 19].

На открытых границах моря задавался двухслойный обмен воды через Босфор, аналогично [19], и среднегодовой приток воды из Азовского моря через Керченский пролив, который принимался, равным $15.5 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$ [7].

Время “раскручивания” модели для получения квазипериодического режима циркуляции составило 24 года, хотя основные черты циркуляции Черного моря появляются уже спустя 5 рас-

четных лет. Более подробное описание валидации модели можно найти в работе [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель адекватно воспроизводит практически все элементы циркуляции, представленные на рис. 1. Модельные расчеты подтверждают тенденцию интенсификации образования ПАЦВ в летний период, когда ОЧТ, теряя устойчивость, интенсивно меандрирует. И, напротив, в зимний период с усилением ветровой накачки ОЧТ наблюдается в виде когерентной, прижатой к континентальному склону струи, а интенсивность генерации ПАЦВ резко снижается [7]. Исключение, однако, составляют КПАЦВ, ряд ПАЦВ Анатолийского побережья и Севастопольский антициклонический вихрь, вероятность появления которых велика как для летнего, так и для зимнего периодов. Однако для “летних” КПАЦВ процесс протрузии не наблюдался. Сравнение ветровых ситуаций для лета и зимы показало, что процесс протрузии КПАЦВ развивался в период длительного усиления северо-восточного ветра, который для выбранного в нашем эксперименте ветрового форсинга приходился на осенне-зимний период. Отметим, что процесс отрыва КПАЦВ от антициклонического меандра в период усиления ветра ранее был выявлен в работе [23] на основе спутниковых и метеорологических наблюдений.

В данной работе мы не будем рассматривать процесс “обычного” прохождения КПАЦВ вдоль Кавказского побережья в сторону Керченского пролива. Этот процесс довольно широко и детально описан по многим наблюдениям [6, 15, 20] и численному моделированию [7, 21]. Остановимся лишь на двух, можно сказать, экзотических случаях: (1) – когда развивающийся КПАЦВ прорывается сквозь ОЧТ и далее диссипирует в восточном циклоническом круговороте и (2) – когда протрузия двух ПАЦВ идет одновременно с южной (анатолийской) и северной (кавказской) сторон. В этом случае их эволюция будет определяться мощностью как обоих ПАЦВ, так и ОЧТ.

3.1. Процесс протрузии КПАЦВ в ОЧТ. Для моделирования процесса протрузии ПАЦВ в ОЧТ в качестве начальных полей температуры, солёности и скорости течения в работе были использованы те, которые сформировались к 24-му расчетному году [7]. Расчеты продолжались при том же форсинге для получения двух рассматриваемых случаев. Первый случай вторжения КПАЦВ в ОЧТ наблюдался в конце 25 начале 26 расчетных годов.

На рис. 2 показаны функция тока на поверхности и возвышение уровня моря H (верхняя па-

нель); функция тока и модуль скорости течения $|U|$ на горизонте 298 м (нижняя панель). Фазы процесса зарождения КПАЦВ, его протрузия в ОЧТ и диссипации в восточном круговороте показаны, соответственно, для 300, 350 (расчетный год 25), 20 и 90 (расчетный год 26) дня по Юлианскому календарю. Нижний слой 298 м (19-й z -слой) соответствует глубине проникновения КПАЦВ. Показательно, что перед протрузией КПАЦВ в ОЧТ в последнем образуется широкий меандр (рис. 2а), а сама протрузия имеет форму струи (filament) (рис. 2б), пробивающая ОЧТ, образуя впоследствии изолированный вихрь (рис. 2в), который постепенно диссипирует в восточном круговороте (рис. 2г). Процесс диссипации вихря идет довольно долго по оценкам – порядка двух-трех месяцев, в зависимости от антициклонической активности вдоль анатолийского побережья. Часто КПАЦВ, прошедший ОЧТ, сливается с Синопским или Кизил-Ирмакским ПАЦВ, не успевая диссипировать. Часть системы КПАЦВ-меандр, оставшейся в прибрежной зоне, развивается и смещается в сторону Керченского ПАЦВ (рис. 2г). Подобный процесс протрузии КПАЦВ по материалам спутниковой альтиметрии ранее был описан в [15, 23]. При этом пространственно-временные параметры процесса хорошо совпадают с результатами моделирования. Заметим, что, как было показано в [10], обнаруженное явление периодической протрузии струи (т.н. Rimini Squirt) в Западное Адриатическое течение связано с бароклинной неустойчивостью. В нашем же случае процесс протрузии, по-видимому, связан с общим усилением ветра в осенне-зимний период, поскольку, несмотря на множество рек на кавказском побережье, влияние стратификации вследствие распреснения морских вод из-за речного стока на динамику КПАЦВ не существенно.

Интересно также изменение 3-мерной структуры КПАЦВ и антициклонического меандра в процессе протрузии. На рис. 2а показана начальная стадия протрузии КПАЦВ, который, в связи с близостью к берегу и наклона дна вносит искажения в ОЧТ на горизонтах выше 200 м. Поэтому на начальной стадии в районе КПАЦВ изолинии функции тока на поверхности не замкнуты, т.е. наблюдается вихрь, окруженный меандром, в то время как на глубине 300 м изолинии функции тока замкнуты, т.е. наблюдается только вихрь. Далее (рис. 2б), с развитием КПАЦВ и его смещением к центру восточного круговорота незамкнутая структура изолиний функции тока на поверхности и 300 м свидетельствует о формировании системы “вихрь-меандр” во всем слое 0–300 м. Рис. 2в и 2г показывают полное отделение вихря от меандра, его перемещение в толще 0–300 м к м. Синоп. На этих стадиях также видно восстановление ОЧТ и сформированный КПАЦВ, идущий

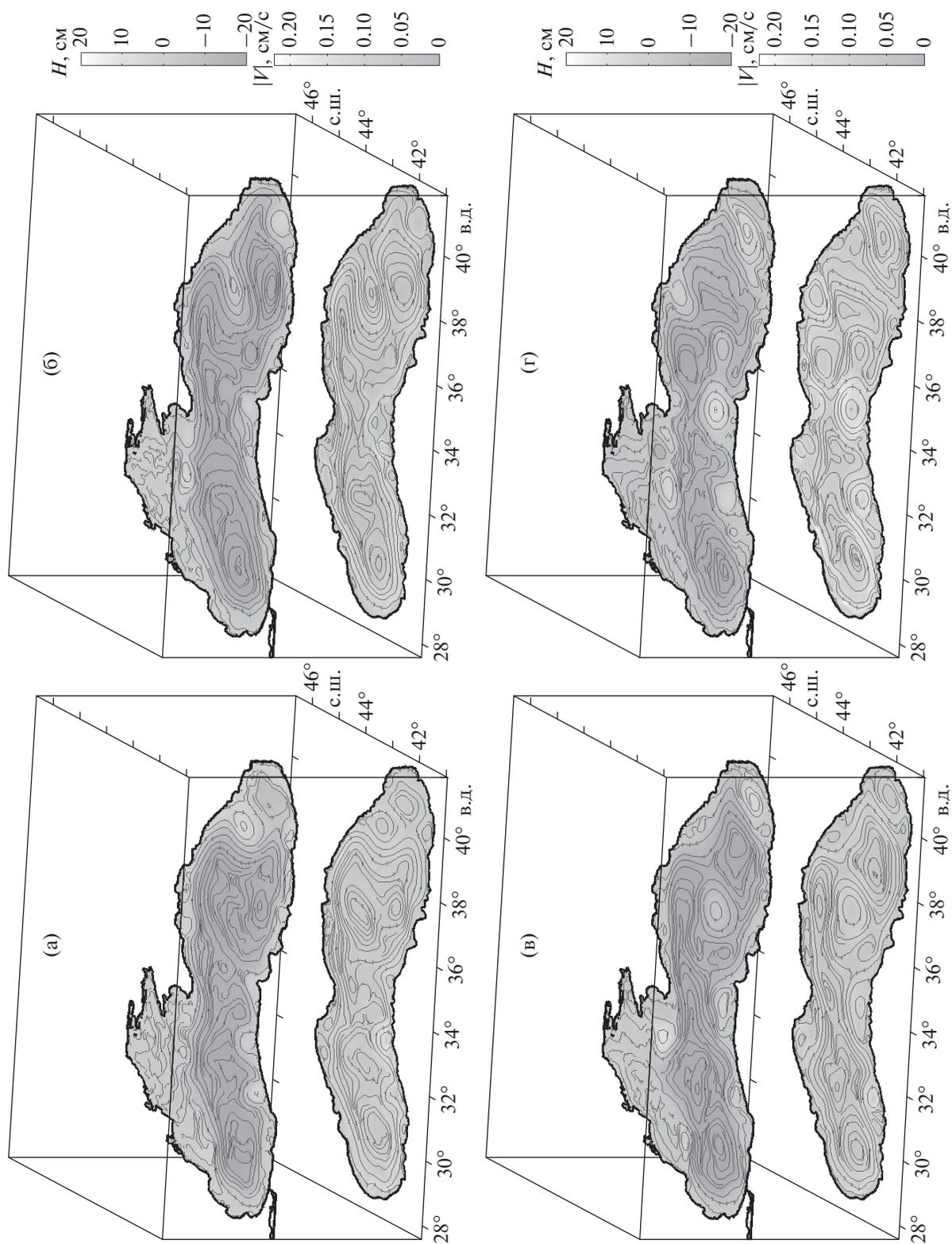


Рис. 2. Функция тока на поверхности и возвышение уровня моря H (верхняя панель); функция тока и модуль скорости течения $|V|$ на горизонте 298 м (нижняя панель). Фазы процесса зарождения КПАЦВ, его протрузии в ОЧТ и диссипации в восточном круговороте показаны соответственно для 300 – (а), 350 – (б) (расчетный год 25), 20 – (в) и 90 – (г) (расчетный год 26) дня.

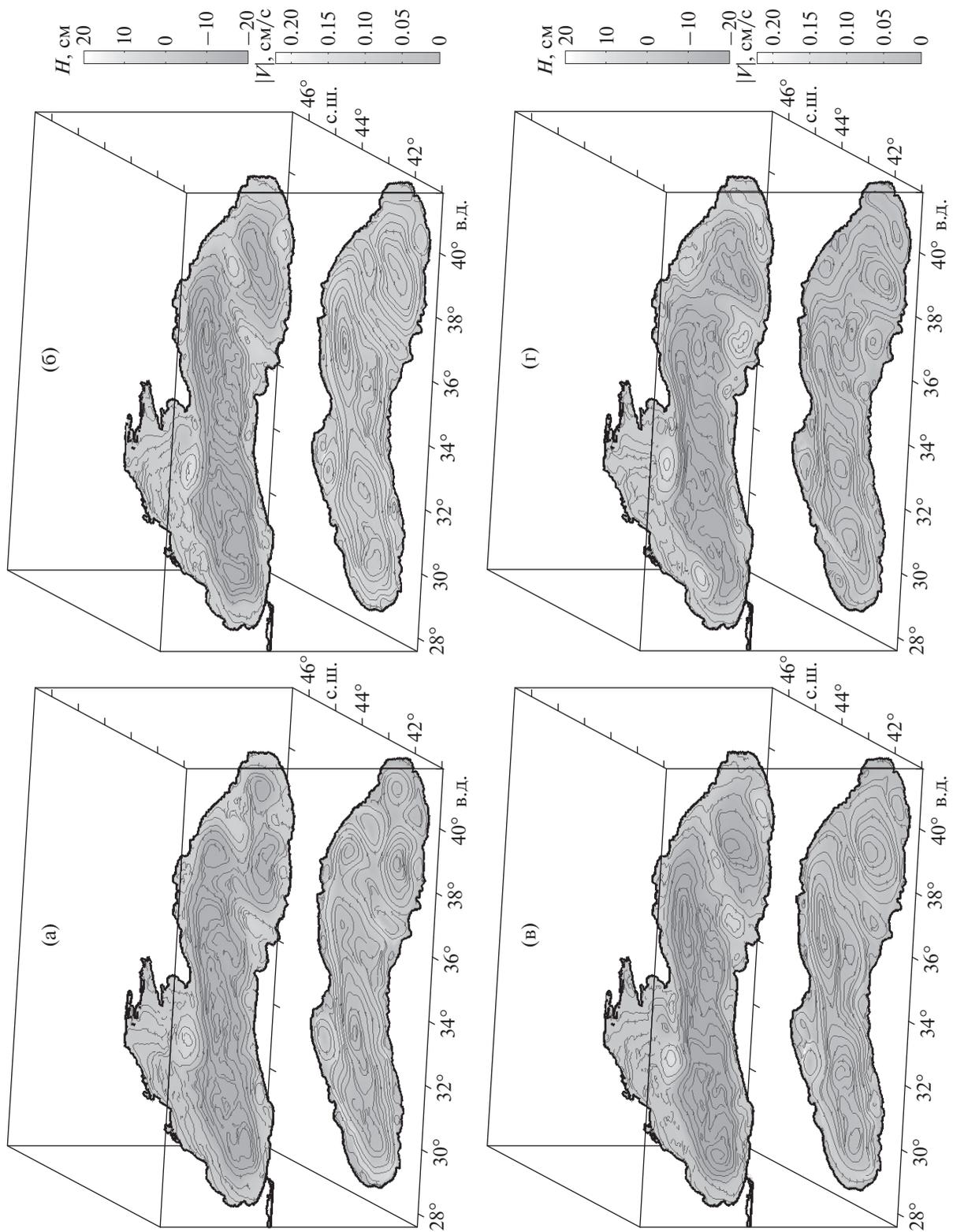


Рис. 3. Функция тока на поверхности и возвышение уровня моря H (верхняя панель); функция тока и модуль скорости течения $|V|$ на горизонте 298 м (нижняя панель). Фазы процесса зарождения КПАЦВ и К-ИПАЦВ, их протрузии в ОЧГ, объединения и восстановления вихрей показаны, соответственно, для 1 – (а), 30 – (б), 40 – (в) и 80 – (г) дня для 27 расчетного года.

вдоль северо-кавказского побережья к Керченскому проливу.

3.2. Процесс двойной протрузии в ОЧТ ПАЦВ с Кавказского и Анатолийского побережий. В работе Коротаяева и др. [15] по данным спутниковой альтиметрии описан процесс протрузии Кавказского меандра и его взаимодействия со структурами Анатолийского побережья в январе–марте 1998 г., приведшие в конечном итоге к формированию изолированного вихря в восточной части Черного моря. Подобный процесс двойной протрузии наблюдался в численном эксперименте в течение 27-го расчетного года.

На рис. 3 показаны функция тока на поверхности и возвышение уровня моря H (верхняя панель), а также функция тока и модуль скорости течения $|U|$ на горизонте 298 м (нижняя панель). Видны фазы процесса зарождения Кизил-Ирмакского ПАЦВ (К-ИПАЦВ) и КПАЦВ (рис. 3а), их протрузии в ОЧТ (рис. 3б), слияния вихрей и разрыв ОЧТ на ветви к западу и востоку от линии слияния (рис. 3в). Система объединенных вихрей существовала около 10 дней, после чего произошло восстановление ОЧТ и новая интенсификация КПАЦВ и К-ИПАЦВ (рис. 3г). В отличие от наблюдений [15], как видно из рис. 3а–3г, процесс протрузии не сопровождается полным отрывом КПАЦВ и К-ИПАЦВ от их оснований в прибрежной зоне, которое бы привело, как в [15], к их объединению и формированию одиночного вихря, диссипирующему в открытом море.

4. ВЫВОДЫ

Вихреразрешающая $(1/30)^\circ$ версия слабодиссипативной модели DieCAST была использована для моделирования процессов протрузии ПАЦВ в ОЧТ. Как показали расчеты и сравнение со спутниковыми наблюдениями, модель достаточно реалистично воспроизводит процессы эволюции прибрежных антициклонических вихрей при их взаимодействии с Основным черноморским течением. Пространственно-временные параметры и характер эволюции ПАЦВ хорошо согласуются с описанными в работах [15, 23] спутниковыми наблюдениями.

Эволюция одиночного КПАЦВ проходит 4 основные стадии: зарождение КПАЦВ, смещение его от берега с одновременным ростом окружающего его антициклонического меандра, протрузия КПАЦВ через ОЧТ и диссипация свободного АЦВ в восточном круговороте. Так, с момента зарождения КПАЦВ, его развития и продвижения вдоль Кавказского побережья с сопутствующим развитием антициклонического меандра до начала протрузии проходит порядка 2 месяцев. Процесс протрузии и отделение КПАЦВ от меандра происходит примерно за 1 месяц. Абсорбция

ПАЦВ, прошедшего сквозь меандр, внутри восточного круговорота наблюдается, как было сказано выше, в течение 2–3 месяцев. Близкие результаты были получены в работе [15], где было показано, что после процесса протрузии КПАЦВ и восстановления антициклонического меандра эта система “вихрь–меандр” движется к Керченскому проливу, что также показывает моделирование. В работе [23] показано, что процесс отделения вихря от антициклонического меандра и его последующая диссипация происходит примерно за 3 месяца, что также близко к полученным оценкам. При этом процесс отделения связывается с общим усилением ветра в период наблюдений.

Начальные 3 стадии процесса двойной протрузии на примере и К-ИПАЦВ проходят подобно тем, что было описано выше, однако на конечных стадиях происходит слияние КПАЦВ и К-ИПАЦВ, вследствие чего происходит разрыв ОЧТ к западу и востоку от зоны слияния вихрей. Спустя 10 дней происходит разъединение вихрей КПАЦВ и К-ИПАЦВ и их постепенное восстановление вместе с ОЧТ к состоянию, близкому к началу протрузии.

В заключение следует отметить, что механизм переноса загрязняющих веществ из прибрежной части в центр моря, связанный с процессами протрузии ПАЦВ, следует рассматривать наряду с другими возможными механизмами. Например, в работах [1, 2, 18, 24], перенос загрязняющих веществ объясняется, в основном, их вовлечением в орбитальное движение крупных синоптических антициклонов, перемещающихся в струе ОЧТ и выносящих загрязнения по своей периферии в центральную часть моря.

Автор благодарит Д.Е. Дитриха за ценные консультации по модели и выражает искреннюю признательность рецензенту за конструктивные замечания и предложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В. и др. Мезомасштабная динамика вод Черного моря // *Океанология на старте XXI века*. М.: Наука, 2008. С. 11–42.
2. Демьяшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2013. Т. 49. № 6. С. 655–663.
3. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П. и др. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // *Исслед. Земли из космоса*. 2000. № 3. С. 71–81.

4. *Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Гулин С.Б и др.* Современные представления о средообразующей и экологической роли струйных метановых газовыделений со дна черного моря // *Морск. экологический журн.* 2003. Т. 2. № 3. С. 5–26.
5. *Калашишникова Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. и др.* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2013. Т. 10. № 3. С. 228–240.
6. *Коротенко К.А.* Адаптивная модель для оценки параметров турбулентности в придонном слое океана // *Океанология.* 1992. Т. 32. № 5. С. 730–738.
7. *Коротенко К.А.* Моделирование мезомасштабной циркуляции Черного моря // *Океанология.* 2015. Т. 55. № 6. С. 909–915.
8. *Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. и др.* Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря // *Океанология.* 2001. Т. 41. № 3. С. 325–334.
9. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Динамика Батумского антициклона по спутниковым данным // *Морск. гидрофиз. журн.* 2015. № 2. С. 67–78.
10. *Cushman_Roisin B., Korotenko K.A., Galos C.E. et al.* Simulation and characterization of the Adriatic Sea mesoscale variability // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C03S14. P. 1–13.
11. *Dietrich D.E., Lin C.A., Mestas-Nunez A. et al.* A High Resolution Numerical Study of Gulf of Mexico Fronts and Eddies // *Meteorol. Atmos. Phys.* 1997. V. 64. P. 187–201.
12. *Ergün M., Dondurur D., Cifci G.* Acoustic evidence for shallow gas accumulations in the sediments of the eastern Black Sea // *Terra Nova.* 2002. V. 14, P. 313–320.
13. *Jaoshvily S.* The Rivers of the Black Sea. Technical Report № 71. Europ. Envir. Agency. 2002. 58 p. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2002_71.
14. *Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I., Surmava A.A.* Dynamical processes developed in the easternmost part of the Black Sea in warm period for 2010–2013 // *J. Georgian Geophys. Soc., Issue B. Physics of Atmosph. Ocean and Space Plasma.* 2013. V. 16b, P. 3–12.
15. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. C3122. P. 1–15. doi 10.1029/2002JC001508
16. *Korotenko K., Bowman M., Dietrich D.* High-resolution model for predicting the transport and dispersal of oil plumes resulting from accidental discharges in the Black Sea // *Terr. Atmosph. Ocean. Sci.* 2010. V. 21. № 1. P. 123–136.
17. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep-Sea Res. Part I. Oceanographic Research Papers.* 2015. V. 97. P. 80–91.
18. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. et al.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *J. Mar. Syst.* 2016. V. 163. P. 80–94.
19. *Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V. et al.* Rim Current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model // *J. Mar. Syst.* 2001. V. 31. № 1-3. P. 137–157.
20. *Sur H.I., Ozsoy E., Unluata U.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Prog. Oceanography.* 1994. V. 33. № 4. P. 249–302.
21. *Wagner-Friedrichs M.* Seafloor seepage in the Black Sea: Mud volcanoes, seeps and diapiric structures imaged by acoustic methods: PhD Thesis. Bremen, 2007. 153 p.
22. *Zatsepin A.G., Denisov E.S., Emel'yanov S.V. et al.* Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea // *Oceanology.* 2005. V. 45. № 1. P. S13–S26.
23. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C8. 3246. P. 1–20.
24. *Zhou F., Shapiro G., Wobus F.* Cross-shelf exchange in the northwestern Black Sea // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 4. P. 2143–2164.

Modeling Processes of the Protrusion of Near-Coastal Anticyclonic Eddies Trough the Rim Current in the Black Sea

K. A. Korotenko

The eddy-resolving (1/30)^o version of the low-dissipative DieCAST [7] ocean circulation model is used for modeling processes of the protrusion of near-coastal anticyclonic eddies (NAEs) through the Rim Current (RC). Under mean climatic forcing, the model realistically reproduces evolution of the Caucasian NAE (CNAE) from its generation, the formation of an attached anticyclonic meander, the protrusion through the RC and, finally, to the formation of an isolated anticyclonic eddy and its dissipation within the Eastern cyclonic gyre of the Black Sea. The process of the double protrusion of CNAE and Kizil-Yirmak NAE in the RC, their passages through the RC and merging in the eastern part of the Black Sea is also considered. Modeled space-time parameters of NAEs evolution are in a good agreement with satellite observations documented in [15, 23].